

## ПОЛЕВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ИХ СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

*Проведено порівняльний аналіз розрахунку ЕРС, зубцового і електромагнітного моментів вентильного двигуна з постійними магнітами у двомірній і тривимірній постановці задачі на платформі JMAG-Designer 12. Бібл. 4, табл. 1, рис. 13.*

*Ключові слова:* вентильний двигун, зубцовий момент, скоп пазу, метод скінчених елементів, магнітне поле, ЕРС.

*Проведен сравнительный анализ расчета ЭДС, зубцового и электромагнитного моментов вентильного двигателя с постоянными магнитами в двухмерной и трехмерной постановке задачи на платформе JMAG-Designer 12. Библ. 4, табл. 1, рис. 13.*

*Ключевые слова:* вентильный двигатель, зубцовый момент, скоп паза, метод конечных элементов, магнитное поле, ЭДС.

**Введение.** В настоящее время вентильные двигатели с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВДПМ) являются объектом интенсивных исследований в связи с расширением их применения в современных системах регулируемого электропривода.

По сравнению с коллекторными и асинхронными двигателями ВДПМ имеют ряд преимуществ, таких, как повышенный момент и мощность на единицу объема, возможность длительной работы без перегрева при малой угловой скорости с высоким моментом на валу, повышенная перегрузочная способность, хорошие регулировочные свойства и динамические характеристики.

На сегодняшний день для ВДПМ разработаны двухмерные (2D) полевые [1] математические модели (ММ), позволяющие определить такие величины как электромагнитные силы и моменты, параметры, потери и т.д. без ряда упрощающих допущений о характере распределения магнитного поля и существенно повысить точность расчета электромагнитных процессов для анализа и проектного синтеза двигателей различных конструктивных исполнений.

Тем не менее, 2D моделирование не дает достаточной точности при расчетах сложной трехмерной (3D) геометрии ВДПМ, так как не учитывает магнитный поток в аксиальном направлении, что может существенно влиять на электромагнитный момент, магнитное поле в торцевой зоне, распределение которого, в свою очередь, влияет на параметры обмоток (индуктивность) особенно при относительно малой длине машины.

Характерной особенностью явнополюсных ВДПМ является специфика электромагнитных процессов, связанная с наличием высококоэрцитивных постоянных магнитов (магнитное насыщение машины по продольной и поперечной осям и его влияние на индуктивности фаз). Кроме того, явнополюсная структура магнитопровода статора приводит к возникновению пульсаций электромагнитного момента и, следовательно, к ухудшению рабочих характеристик и эксплуатационных свойств ВДПМ.

В данной статье проводится сравнительный анализ и проверка адекватности расчета ВДПМ в программном пакете JMAG-Designer в двухмерной и трехмерной постановке задачи на примере снижения пульсаций зубцового момента и расчета линейных ЭДС ВДПМ.

**Объектом исследования** служит тяговый двигатель для шахтного электровоза (рис. 1), разработанный в ООО "Электротехника – Новые технологии" (г. Одесса), конструкция [2] которого представлена на рис. 2. Магниты располагаются непосредственно внутри ротора. Статор такого двигателя выполняется в виде явнополюсной структуры с прямыми полюсами и открытыми пазами, в которые уложена катушечная обмотка. Такая обмотка статора имеет простую технологию изготовления и минимальные по длине лобовые части.



Рис. 1. Комплектный электропривод: двигатель с интегрированной системой управления

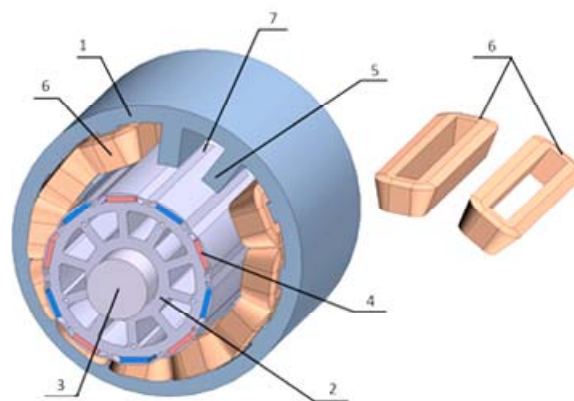


Рис. 2. Явнополюсный ВДПМ с сосредоточенной обмоткой статора

Вентильный электрический двигатель содержит статор 1, внутри которого расположен ротор 2, закреп-

ленный на валу 3. Внутри ротора 2 встроенные постоянные магниты 4. Статор 1 выполнен в виде явнополюсной структуры с прямыми полюсами 5 и открытыми пазами 7, в которые уложена катушечная обмотка 6.

**Методы и этапы исследования.** На рис. 3 и рис. 4 представлены полевая 3D и 2D ММ ВДПМ соответственно, разработанные в программе JMAG-Designer [3] согласно геометрическим размерам и обмоточным данным, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Геометрические размеры и обмоточные данные двигателя

Наименование	Значение
Внешний диаметр статора, мм	360
Внутренний диаметр статора, мм	217
Число зубцов статора	12
Длина активной части, мм	240
Число полюсов ротора	10
Число витков катушки обмотки статора	10
Размеры магнитов (NdFeB), мм	240×35,5×6,3
Воздушный зазор, мм	2,5

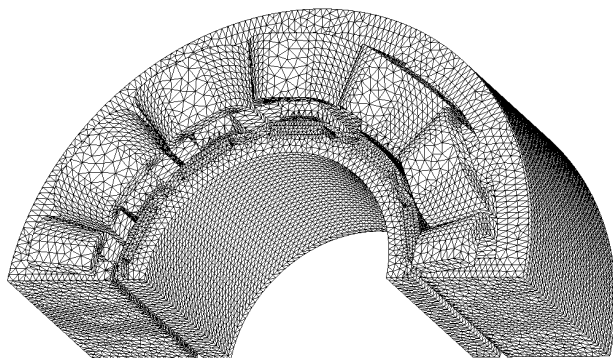


Рис. 3. Трехмерная конечно-элементная аппроксимация ВДПМ

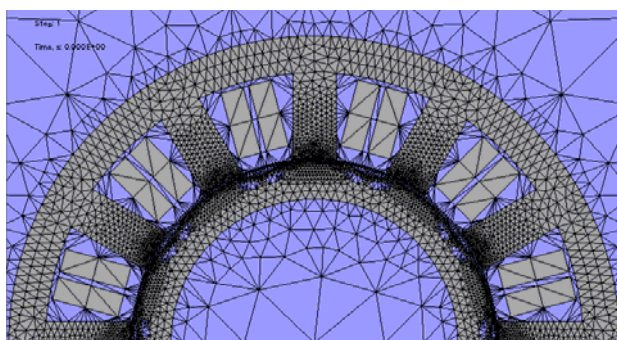


Рис. 4. Двухмерная конечно-элементная аппроксимация ВДПМ

Число элементов конечно-элементной сетки 3D модели составляет 700000, и 35000 для 2D модели. При таком числе конечных элементов достигается достаточно подробная аппроксимация геометрии ВДПМ. Для экономии ресурсов ЭВМ и уменьшения времени вычислений, была взята четверть 3D модели ВДПМ и половина 2D. Для этого при построении 2D модели были применены периодические граничные условия (рис. 5), так как магнитное поле исследуемого ВДПМ имеет периодичность 180 градусов и на-

правление магнитного поля на границе меняет знак на каждом периоде. Для построения 3D модели были применены периодические граничные условия и симметричные (магнитный поток параллелен границе) в аксиальном направлении ВДПМ граничные условия (рис. 6.). На границах расчетных областей 2D и 3D моделей ВДПМ были применены граничные условия Дирихле – векторный магнитный потенциал  $A = 0$ .

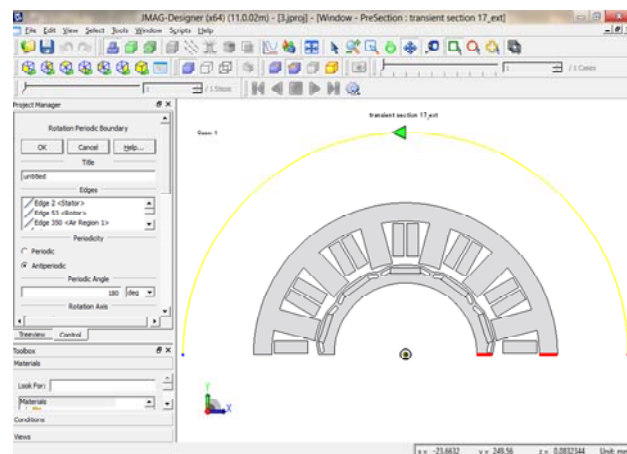


Рис. 5. Периодические граничные условия

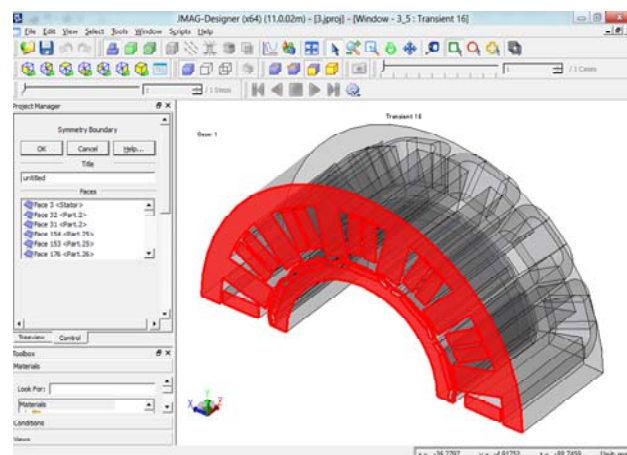


Рис. 6. Симметричные граничные условия

На рис. 7 показаны результаты расчета двухмерного магнитного поля ВДПМ в виде линий равного векторного магнитного потенциала, а на рис. 8 – трехмерного магнитного поля в виде распределения магнитной индукции.

Первым этапом исследования является проверка адекватности полевой модели ВДПМ. Расчетно определим форму линейных ЭДС ВДПМ и сопоставим с экспериментально снятыми. Для этого к катушкам полевой модели подключим электрическую цепь, реализованную в редакторе цепей JMAG-Designer (рис. 9.).

Электрическая схема состоит из шести катушек обмотки статора (так как рассматривается половина 2D модели и четверть 3D модели ВДПМ), соединенных звездой, при помощи которых воспроизводится связь полевой модели с электрической цепью, резисторов (R1, R2, R3), точки заземления, амперметров, одноконтактных вольтметров, которые измеряют напряжение относительно земли. Резисторы R1, R2, R3 (рис. 9) сопротивлением по 1 МОм моделируют

большое сопротивление отключенных фаз. Они необходимы для создания замкнутых контуров протекания тока при выполнении расчета цепно-полевой модели.

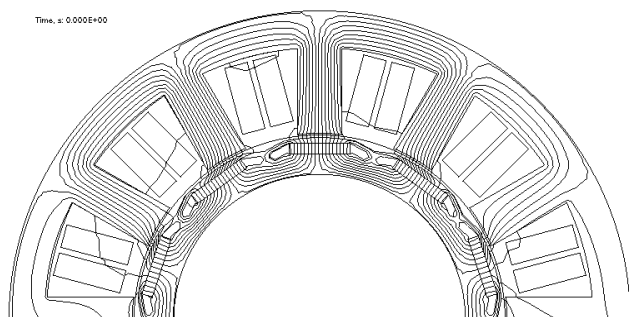


Рис. 7. Распределение двухмерного магнитного поля ВДПМ

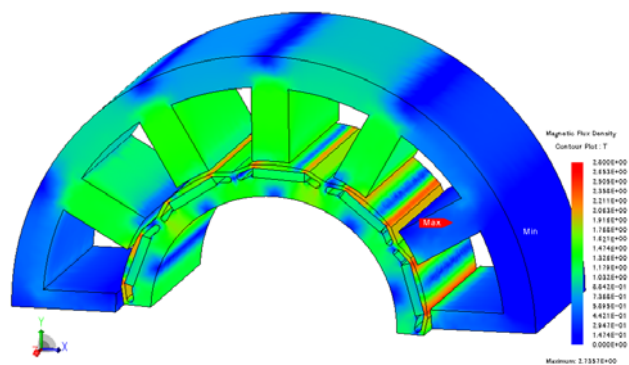


Рис. 8. Распределение трехмерного магнитного поля ВДПМ

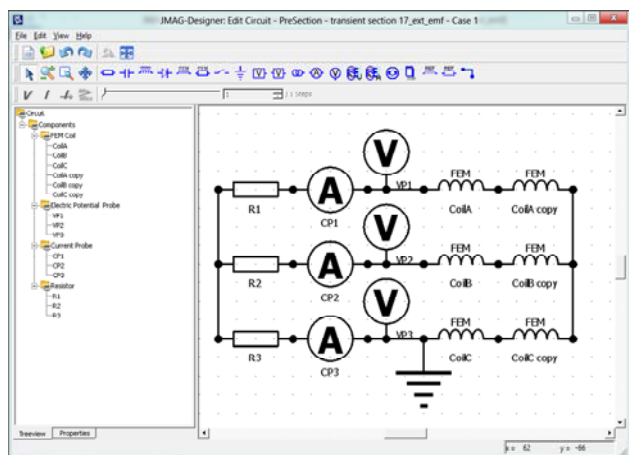


Рис. 9. Редактор цепей JMAG-Designer

Расчетная форма линейной ЭДС 2D и 3D расчетов, полученная на скорости 300 об/мин и сопоставленная с экспериментальными данными, представлена на рис. 10.

Из приведенных на рис. 10 зависимостей видно, что разница между экспериментальной и расчетной зависимостями не превышает 5-7 %, а результаты 2D и 3D расчетов практически совпадают. Следовательно, цепно-полевую модель ВДПМ можно считать адекватной.

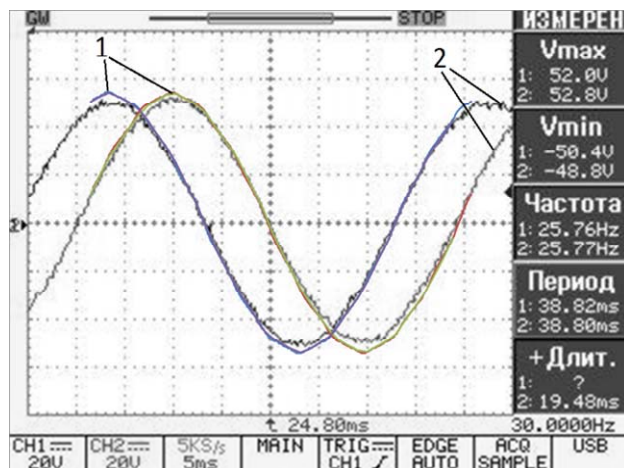


Рис. 10. Линейные ЭДС: 1 – расчет (2D, 3D); 2 – эксперимент

Следующим этапом исследования полевой ММ ВДПМ является получение зависимости результирующего электромагнитного  $M = f(\theta)$  и зубцового момента  $M_z = f(\theta)$  от угла поворота ротора  $\theta$ .

Для получения зависимости  $M = f(\theta)$  зададим ток 120 А в двух фазах ВДПМ и определим электромагнитный момент при повороте ротора от 0 до 72 механических градусов, что соответствует 360 электрическим градусам.

Для получения зависимости  $M_z = f(\theta)$  зададим ток в фазах ВДПМ равным нулю и определим момент от действия постоянных магнитов при повороте ротора от 0 до 72 механических градусов.

В результате расчетов магнитного поля получены зависимости зубцового момента  $M_z = f(\theta)$  и результирующего момента  $M = f(\theta)$  (рис. 11), из которых видно, что амплитуда результирующего момента, полученного из 2D и 3D расчетов, приблизительно одинакова и составляет 236 Н·м, но форма результирующего момента отлична от синусоидальной из-за действия зубцового момента, который возникает из-за действия магнитного поля постоянных магнитов при отсутствии тока в обмотке статора. Амплитуда зубцового момента равна 1,9 Н·м, и составляет 0,8 % от величины результирующего момента.

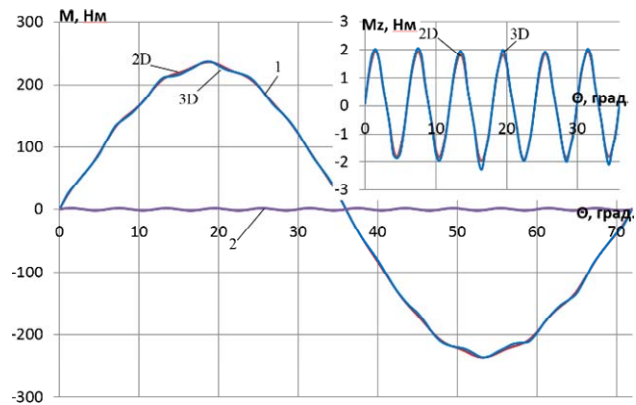


Рис. 11. Зависимости: 1 –  $M = f(\theta)$ ; 2 –  $M_z = f(\theta)$

Для уменьшения уровня пульсаций зубцового момента, статор исследуемого ВДПМ выполнен со

скосом пазов на 6 градусов. Однако смоделировать скос в двухмерной постановке задача не представляется возможным. Выполним скос пазов статора в трехмерной модели (рис. 12) и определим электромагнитный момент.

Как видно из рис. 13 путем скоса пазов на статоре удалось устранить пульсации момента при практически неизменном уровне максимального электромагнитного момента, который равен 233 Н·м.

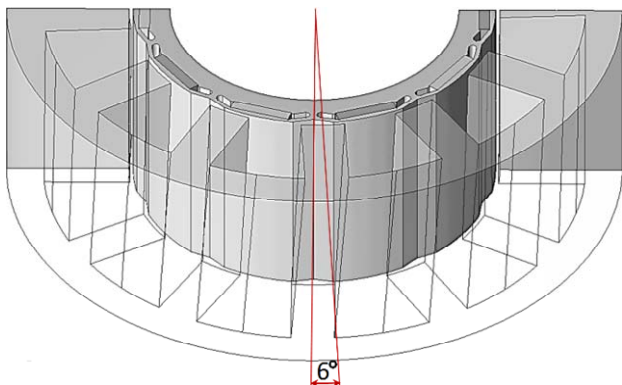


Рис. 12. Геометрия ВДПМ со скосом пазов статора

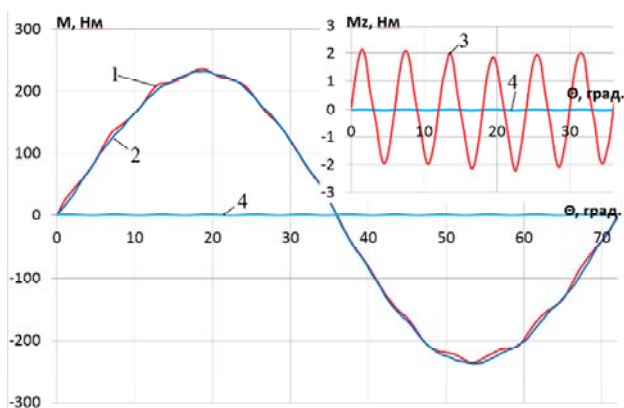


Рис. 13. Зависимости:

- 1 –  $M = f(\theta)$  без скоса; 2 –  $M = f(\theta)$  скос 6 град.;  
3 –  $M_z = f(\theta)$  без скоса; 4 –  $M_z = f(\theta)$  скос 6 град.

Проанализировав зависимости моментов полученных из 2D и 3D расчетов, можно отметить, что разница между результатами не существенна и величина зубцового момента даже без скоса пазов статора достаточно мала по сравнению с результирующим моментом, что является достаточно хорошим результатом, который был достигнут благодаря тому, что при разработке исследуемого ВДПМ руководствовались рекомендациями [4].

## Выводы.

Проанализировав представленные зависимости можно сделать следующие выводы:

1. Расчет магнитного поля в трехмерной постановке задачи позволяет учесть влияние скоса пазов, служащего для уменьшения пульсаций зубцового момента в ВДПМ.

2. Расчет линейных ЭДС показал, что результаты 2D и 3D расчетов практически совпадают, а значит, в случаях, когда некоторыми особенностями геометрии можно пренебречь, для экономии времени целесообразно применение 2D ММ при расчете ВДПМ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радимов И.Н., Рымша В.В., Чан Тхи Тху Хьонг, Процина З.П. Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами // *Электротехника і електроμηχανіка*. – 2008. – №5. – С. 26-28.
2. Мальований О.Є., Радимов І.М., Римша В.В., Матющенко О.В. Патент України на корисну модель № 77359. Вентильний електричний двигун UA МПК H02K 29/10 (2006.01). Публ. 11.02.2013, Бюл. №3.
3. Электронный ресурс: <https://www.jmag-international.com>.
4. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. CRC Press, 2010. – 611 p.

## REFERENCES

1. Radimov I.N., Rimsha V.V., Chan Thi Thu Huong, Procina Z.P. Geometrical proportions in a brushless DC motor. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.5, pp. 26-28. (Rus).
2. Malyovanyj O.E., Radimov I.N., Rimsha V.V., Matyuschenko A.V. *Ventyl'nyj elektrychnyj dvygun* [Valve electric motor]. Patent UA, no.77359, 2013.
3. Available at: <https://www.jmag-international.com> (accessed 13 September 2013).
4. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives, CRC Press, 2010. 611 p. doi: 10.1201/9781420014235.

Поступила (received) 14.10.2014

Матющенко Александр Владимирович, аспирант,  
Одесский национальный политехнический университет,  
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,  
тел/phone +38 097 3730502, e-mail: sparkam@rambler.ru

A.V. Matyuschenko

Odessa National Polytechnic University,  
1, Shevchenko Str., Odessa, 65044, Ukraine.

### Mathematical field models of brushless DC motors with permanent magnets and their comparative analysis.

By means of JMAG-Designer 12 the author performed a comparative analysis of the calculation of the EMF, cogging torque and electromagnetic torque of brushless motor with permanent magnets in two-dimensional and three-dimensional formulation of the problem. References 4, table 1, figures 13.

Key words: brushless DC motor, cogging torque, slot skew, FEM, magnetic field, electric circuit, EMF.